17 境界適合座標系による曲がり円管内流れの数値解析

日本原子力研究所 刃刀資彰^{*}、横川三津夫

宇都宮大学工学部 秋山光庸

編ソフトウェア・クレイト^ル 中西純一NUMERICAL SIMULATION FOR VARIOUS CURVED PIPES
USING A BOUNDARY-FITTED COORDINATE SYSTEMTomoaki KUNUGI⁺, Mitsuo YOKOKAWA⁺,
Mitsunobu AKIYAMA⁺⁺ and Jun-ichi NAKANISHI⁺⁺⁺

Three-dimensional laminar flows in various curved pipes (i.e., $Rc/a=2, 4, 7$ and 9 for curved 180 degree pipes and $Rc/a=2$ and 4 for curved 90 degree pipes) were numerically simulated by using time-dependent incompressible Navier-Stokes equations. The boundary-fitted coordinate system was used in order to treat the complicated boundary configurations of strongly curved pipes. The obtained flow patterns and the magnitude of the secondary flow in case of $Rc/a=9$ for curved 180 degree pipe were in good agreement with the experimental results. The ellipticity of the basic equation was very important to simulate these recirculating flows, especially when the curvature ratio was small. Velocity and pressure fields were visualized by a pseudo-color technique on a workstation.

1. はじめに 最近のコンピュータの発達に伴い、曲がり円管内の流れのように座標系や方程式系の取り扱いが複雑な場のシミュレーションが可能¹⁾となってきた。本報告は、曲がり円管内流れで通常使われている流れ方向の放物型近似を行わず、境界適合座標系を用いた三次元楕円型ナビエ・ストークス方程式を直接数値積分する手法で解析した結果の一部をまとめたものである。計算条件としては、曲がり角度 $\Omega = 90^\circ$ および 180° の場合で曲率半径比 $Rc/a = 2 \sim 9$ 、円管径 $d (= 2a : a$ は半径) を基準としたレイノルズ数 $Re = 1000$ の場合を主として取り扱った。これらの結果をワークステーション上で色階調表示して視覚化し、曲率半径比の効果と曲がり角度による流れ場の違いを明確に示すことができた。また、スーパーコンピュータでの高速化のためのベクトル化手法についても検討した。

2. 数値解析 非定常三次元の非圧縮性流体に対する Navier-Stokes 式を境界適合座標系で記述する。流速の反変成分を以下のように定義すれば、

$$U = \xi_x u + \xi_y v + \xi_z w, \quad V = \eta_x u + \eta_y v + \eta_z w, \quad W = \zeta_x u + \zeta_y v + \zeta_z w \quad \cdots (1)$$

これによって、Navier-Stokes 式を以下のように

極めて簡潔に表現できる。なお、反変流速成分は対流項に三次の風上差分 QUICK を適用する際の風向きの判定に使用する。

$$Q_i + E_i + F_i + G_i = S \quad \cdots (2)$$

(a) coarse(21x21) (b) fine(31x31)
Fig.1 Grids configuration

⁺ Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Ibaraki, Japan
⁺⁺ University of Utsunomiya, Ishii-cho, Utsunomiya, Tochigi, Japan
⁺⁺⁺ Software CRADLE Co. Ltd., Nishinakajima, Yodogawa-ku, Osaka, Japan

式(2)の各項についての詳細は紙面の都合上省略するが、 Q は(時間項)、 $E \sim G$ は(対流項、圧力項、粘性項をまとめた項)、 S は(ソース項)を表している。各変数は全ての計算格子点上で定義しており、境界条件およびソース条件の扱いは一般化した形式²⁾を採用している。本報の場合、管路入り口に一樣流速、壁面に滑り無し条件を与え、管路出口では自由流出条件(主流方向の各流速の勾配が0)を与えた。また、圧力については管路出口で0、壁面上では垂直方向勾配を与えた。対流項には、三次の風上差分スキームであるQUICKを適用しているが他の項の空間微分については中心差分を施している。実際の計算では、圧力補正量についてのポアソン方程式をMICCG法を用いた繰り返し計算によって解き、得られた圧力補正量を使って圧力場、速度場を補正する方式で時間発展させながら準定常状態を得た。速度場についてはさらにSOR法も併用している。Fig.1は本計算で用いた管断面(η, ζ)の格子体系である。(a)は粗い格子系で(ξ, η, ζ): $\Omega = 90^\circ$ の場合(43, 21, 21)、 180° の場合(53, 21, 21)である。この場合、計算の主記憶容量は約14MB必要とした。(b)は比較的細かい格子系で $\Omega = 90^\circ$ の場合(121, 31, 31)、 180° の場合(151, 31, 31)である。この場合は約80MBを必要とした。このような大規模の粗行列を高速に解くため、MICCGをHyper-Plane方式でベクトル化し、約5倍の速度向上が得られた。計算は両方の格子体系で進めたが、(b)の格子で $\Omega = 180^\circ$ 、 $Re/a = 4$ の計算を実行した結果、圧力分布等が(a)での結果とほぼ一致したので、今回は主に(a)の粗い格子系での結果について報告する。

Fig.2 Grids configuration
($Rc/a=9, Re=1000, De=Re(a/Rc)^{1/2}=333$)

Fig.4 Pressure Distribution

Fig.3 Comparison of flow patterns

3. 180° 曲がり管の結果

Fig.2に曲率半径比 $Rc/a=9$ の場合の格子図を示す。以下の曲がり管には助走区間として上流・下流にそれぞれ $10d$ の直管を接続している。Fig.3は、流れの可視化実験の結果²⁾と本計算結果とを比較したものである。全体的なパターンは良く一致しており、2次流れの最大値も平均流の約25%と実験値(約20%)とほぼ一致した。また、 $\Omega=90^\circ$ での4個の渦も明瞭に捉えられており、本計算の妥当性を示しているものと考えられる。Fig.4は管路壁に沿った圧力分布を示したものである(図中の破線間は曲管部分)。中央の実線は上下壁面、上側の実線は外側壁面、下側の実線は内側壁面での無次元圧力値を示している。曲がり部入り口の上流側で既に内外壁に圧力差を生じ、出口に到達する以前に圧力差が減少し始める様子が分かる。このような結果は放物型の方程式を用いた解析では得られず、楕円型の効果であると考えられる。付加渦については、 $Re=3000$ の場合においても外回り側に同様な2個の渦を得た。一方、Agrawalら⁴⁾の条件($Rc/a=7$, $Re=900$)で計算した結果、彼らの示した内回り側の渦対は確認されなかった。これについては、実験を含めて今後の検討課題であろう。次に急激な曲がり管の例として $Rc/a=2$ を取り上げ、Fig.5に格子図、Fig.6に速度ベクトル、Fig.7に等圧線図を示す。曲率半径比が小さくなったため曲がり部出口付近で流れのはく離傾向が見られ、下流側直管部に大きな2次流れが生じている。各部の断面内速度ベクトルをFig.8に示す。曲管部内の2次流れのパターンは他のケースとそれ程変化は見られないが、下流側直管部でのパターンは非常に複雑な様相を示しており、実験的な検討が必要であろう。Fig.9は圧力分布を示しているが、曲がりの緩やかな場合と比較して内外壁間の圧力差が非常に大きく、特に曲がり部入り口付近での圧力降下が大きいことが分かる。

Fig.5 Grids configuration
($Rc/a=2$, $Re=1000$, $De=707$)

Fig.8 Secondary Flow Vectors

Fig.6 Velocity Vectors

Fig.7 Pressure Contours

Fig.9 Pressure Distribution

Fig.12 Pressure Distribution

Fig.13 Pressure Distribution

4. 90° 曲がり管の結果 Figs.10,11にそれぞれ $Rc/a=4,2$ の場合の (ξ, η) 面内の格子分割図、等圧線図、速度ベクトル図および曲がり部出口位置での2次流れベクトル図を示す。曲率半径比が小さい方がはく離が強く、下流側直管出口までその影響が及んでいることが分かる(Fig.11)。 (ξ, η) 面内の流れ場のパターンは武本¹⁾の結果と良く一致しているが (η, ζ) 面内の2次流れパターンは若干異なっており、格子点数・位置および下流直

管部の長さについての検討が必要であろう。Figs.12,13はそれぞれ $Rc/a=4,2$ の場合の圧力分布を示している。 $Rc/a=2$ の場合、 $\Omega=180^\circ$ の場合と同様に曲がり管入り口付近での急激な圧力降下が見られる。この圧力差は $\Omega=180^\circ$ の場合とほぼ同程度であることから、 $\Omega=180^\circ$ の曲がり管の方がややはく離しにくい傾向にあるようである。

参考文献 (1)武本,核融合研究,58-1,50(1987);(2)三木他,原子力誌,Vol.27,497(1985)
(3)秋山他,機論,50-449,286(1984);(4)Agrawal,Y.et al.,J.F.M.,85-3,497(1978)

Fig.10 Grids, Pressure Contours and Velocity Vectors ($Rc/a=4$) Fig.11 Grids, Pressure Contours and Velocity Vectors ($Rc/a=2$)